

**О. П. УСАТИЙ, Ю. Г. ПАЩЕНКО, О. П. АВДЕЄВА**

**ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ДВОХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПІДХОДІВ  
З ПРОЕКТУВАННЯ ТА ВИГОТОВЛЕННЯ РОБОЧИХ РЕШІТОК ЦИЛІНДРА ВИСОКОГО  
ТИСКУ ТУРБИНИ К-330-23,5**

В роботі наведена порівняльна оцінка ефективності двох технологічних підходів з проектування та виготовлення робочих решіток ротора циліндра високого тиску (ЦВТ) турбіни К-330-23,5. Один підхід потребує використання більш удосконаленої, але і більш дорогої технології виготовлення робочих лопаток, використання яких дозволяє отримати більш ефективні робочі решітки ротора ЦВТ. Інший підхід базується на використанні спрощеної технології виготовлення робочих лопаток з меншими витратами на їх виробництво, але їх використання призводить до виникнення додаткових втрат енергії в таких решітках, що веде до зниження ефективності решіток і всієї проточної частини ЦВТ турбіни К-330-23,5.

**Ключові слова:** ротор турбіни, робочий профіль, робоча лопатка, робоча решітка, оптимізація, проточна частина, технологія.

**А. П. УСАТЫЙ, Ю. Г. ПАЩЕНКО, Е. П. АВДЕЕВА**

**СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ДВУХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
ПОДХОДОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ РАБОЧИХ РЕШЕТОК  
ЦИЛИНДРА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ТУРБИНЫ К-330-23,5**

В работе приведена сравнительная оценка эффективности двух технологических подходов по проектированию и изготовлению рабочих решеток ротора цилиндра высокого давления (ЦВТ) турбины К-330-23,5. Один подход требует использования более совершенной, но и более дорогой технологии изготовления рабочих лопаток, использование которых позволяет получить более эффективные рабочие решетки ротора ЦВТ. Другой подход базируется на использовании упрощенной технологии изготовления рабочих лопаток с меньшими затратами на их производство, но их использование приводит к возникновению дополнительных потерь энергии в решетках, что ведет к снижению эффективности решеток и всей проточной части ЦВТ турбины К-330-23,5.

**Ключевые слова:** ротор турбины, рабочий профиль, рабочая лопатка, рабочая решетка, оптимизация, проточная часть, технология.

**O. USATYI, YU. PASCHENKO, O. AVDIEIEVA**

**A COMPARATIVE EVALUATION OF THE EFFICIENCY TWO TECHNOLOGICAL  
APPROACHES TO THE DESIGN AND MANUFACTURE OF THE BLADE CASCADES OF  
HIGH PRESSURE CYLINDER TURBINE K-330-23.5**

The purpose of this research is to study and substantiate the possibility of the use of two options of the technology to manufacture blades in order to provide an optimal variant of the flow part for the high pressure cylinder (HPC) turbine K-330-23.5. The methods of comparative analysis have been used for the comprehensive estimation of the advantages and drawbacks of each technology in question used for the design and manufacture of blades. To solve optimization problems we used the methods of multiparametric multicriterion and multilevel optimization of complex engineering objects. These methods are based on the use of the algorithms of experimental design theory, LPt-sequence, "bee swarm", nonlinear programming, etc. The computation of steam flow in the turbine flow part and water steam properties has been based on the use of the methods of numerical solution of appropriate equation systems. CFD-methods have been used to estimate the efficiency of rotors assembled using the blades that were manufactured based on the technologies of a different level of complexity. The calculated analysis and the optimization research showed that contemporary optimization methodologies used to get optimal flow parts for the HPC of K-330-23.5 turbine allow us to provide highly efficient flow parts for the HPC using the two types of technologies suggested for the manufacture of blades and blades cascades. At the same time, the research done proved that the use of more expensive technology for the manufacture of blades combined with the solution of multiparametric optimization problem provides a high gain both in the efficiency factor and the cylinder power in comparison with a simpler technology used for the manufacturing of blades. The use of contemporary optimization algorithms allows for a considerable increase in the efficiency of the flow parts of steam turbines even if simplified technologies are used to manufacture rotor blades.

**Key words:** the turbine rotor, blade profile, blade, blades cascade, optimization, flow part, and the technology.

### **Вступ**

Відомим є факт, що циліндри високого тиску парових турбін роблять істотні внески в загальні інтегральні показники (потужність та ККД) турбоагрегатів. Головним чином це обумовлено тим, що через проточну частину (ПЧ) циліндрів високого тиску проходить максимальна масова витрата пари. Це накладає особливі вимоги на проектування ПЧ ЦВТ і їх соплового облопачення та облопачення роторів. Для того, щоб максимально використа-

ти переваги ЦВТ, які обумовлені протіканням максимальної витрати пари через його ПЧ, раціональними виглядають рішення направлені на підвищення наявного теплоперепаду і ККД, особливо першого відсіку ЦВТ. Правильність таких рішень підтверджується розрахунковими дослідженнями з оптимізації параметрів, як теплових схем турбоагрегатів [1], так і проточних частин парових турбін [2]. Особливо гостро стоїть проблема створення високоефективних турбінних ступенів для проточних частин ЦВТ з високим рівнем наявного тепло-

вого перепаду. Найбільше ця проблема торкається облопачення роторів ЦВТ.

На сьогодні, не виникає сумніву, що створення високоефективних проточних частин парових турбін неможливе без використання в процесі проектування сучасних досягнень в галузі оптимального проектування складних технічних систем [3, 4, 5], до яких відноситься і проточна частина ЦВТ.

Отримані оптимальні проектні рішення повинні бути реалізовані в конструкторській та технологічній документації, яка забезпечить відповідний процес виробництва оптимальної конструкції парової турбіни. Безумовно рівень та можливості технології виробництва можуть внести корективи в результат оптимізації, що звісно вплине на кінцевий результат. Тому, інколи виникає необхідність в додаткових дослідженнях з оцінки впливу на ефективність ПЧ різних варіантів технологічних розв'язань цієї проблеми та обґрунтування вибору того чи іншого варіанту технології виготовлення відповідної деталі.

В даній роботі надаються результати проведених широкомасштабних розрахункових дослідження з пошуку високоефективних оптимальних конструктивних рішень для ПЧ ЦВТ турбіни К-330-23,5 АТ «Турбоатом», робочі лопатки яких можуть бути виготовлені цільнофрезерованими за двома різними технологіями. Цільнофрезерована робоча лопатка являє собою суцільну деталь, яка має замкову частину, замкову та бандажну полки, а також розташоване між ними перо лопатки.

Профільна частина пера лопаток ротора ЦВТ повинна формуватися з атласного профіля Р2, або його аналога – профіля ММК1. Ввігнута частина («животик») цих профілів описується дужкою кола відповідного радіуса. Використання оригінальних (атласних) варіантів профілів Р2 або ММК1 дозволяє створити робочі решітки ротора ЦВТ з високою аеродинамічною ефективністю. Зміна, або відхилення форми профільної частини пера лопатки може призвести до зниження аеродинамічної ефективності робочих решіток та ККД проточної частини ЦВТ.

Технологічні проблеми виготовлення цільнофрезерованих робочих лопаток ротора ЦВТ пов'язані з тим, що, «животик» профілів описується дужкою кола з радіусом, що відповідає радіусу фрези, яка оброблює «животик» робочої лопатки. Очевидно, що фреза кріпиться на оправці, тіло якої в процесі обробки «животика» лопатки не повинно дотикатися до полку. Це обмеження обумовлює максимально можливу відстань від краю полки до оброблюваної поверхні «животика» лопатки. Таким чином, перо лопатки повинно розташовуватися на полках поближче до їх краю, що в результаті призводить до звисання вихідної кромки пера лопатки з замкової та бандажної полку. При складанні робочих решіток на роторі, звисаючі вихідні кромки повинні розташовуватися на пол-

ках сусідньої робочої лопатки. Це суттєво ускладнює процес складання робочих решіток ротора.

Є дві технології, які дозволяють розв'язати цю проблему:

1 Перша технологія базується на виконанні технологічної підрізки звисаючої вихідної кромки в приторцевих зонах біля замкової та бандажної полку для того, щоб створити гарантовані щілини, які дозволяють провести необхідне складання робочих решіток. Звичайно, наявність гарантованих щілин негативно впливає на аеродинамічні характеристики каналу та на його ефективність.

2 Друга технологія дозволяє відмовитися, як від звисання вихідних кромок з відповідних полку, так і від необхідного їх підрізування. Це досягається тим, що при формуванні пера лопатки використовується робочий профіль, який відрізняється від атласного (Р2), або оригінального профіля ММК1 і має збільшений радіус «животика». В цьому разі можна розташувати перо робочої лопатки далі від краю полку і тим самим уникнути звисання вихідної кромки. Однак, таке рішення призводить до формування міжлопаткових каналів решіток з погіршеними аеродинамічними характеристиками.

З точки зору аеродинамічної ефективності кожна з технологій має свої переваги і недоліки. Оцінити, яка з них забезпечить створення більш ефективних робочих решіток ротора ЦВТ можливо тільки за допомогою відповідних розрахункових досліджень та всебічного аналізу.

## Мета роботи

Метою цієї роботи є вивчення та обґрунтування можливості використання двох варіантів технології виготовлення робочих лопаток ротора для оптимального варіанту проточної частини ЦВТ турбіни К-330-23,5.

## Виклад основного матеріалу

Порівняльні розрахункові дослідження впливу кожної із технологій на ефективність ПЧ ЦВТ були проведені для оптимальних варіантів проточних частин.

### 1 Основні і обов'язкові умови виконання поставленої мети

Для забезпечення виконання поставленої мети спочатку були розв'язані дві обов'язкові задачі:

1 Удосконалена математична модель, що описує термогазодинамічні процеси в ПЧ осьових турбін.

2 Розроблена методика оцінки впливу розміру і форми підрізки вихідних кромок робочих лопаток на ефективність робочих решіток ротора.

Удосконалення математичної моделі, яка описувала термогазодинамічні процеси в ПЧ [4–6], дало можливість оцінювати ефективність проточної частини ЦВТ, лопатки якої формуються із соп-

лових і робочих **профілів заданої форми**, наприклад, P2, ММК1, або [7]. Це дозволило перейти до нового класу задач оптимального проектування, які забезпечують найбільш точний облік умов і обмежень реального проектування і технології виготовлення осевих турбін. Розроблений алгоритм дозволяє за відомими значеннями кута установки та шагу решітки знайти значення ефективного кута виходу та геометричного кута входу для профіля заданої форми.

Деякі особливості цього алгоритму наведені нижче. Він підходить для роботи з турбінними профілями, які описані дугами кіл. В цьому випадку відомими повинні бути геометричні характеристики таких профілів, зокрема:

- 1 Координати центрів кіл, що утворюють профіль.
- 2 Координати точок сполучення кіл.
- 3 Номери кіл, які беруть участь в утворенні горла решітки профілів.
- 4 Початковий кут установки.
- 5 Геометричний кут входу при початковому куту установки.

Крім того, повинні бути задані параметри, що характеризують решітку профілів, а саме:

- 1 Хорда профілю.
- 2 Шаг решітки.
- 3 Кут установки профілю.

Наявність зазначених параметрів дозволяє однозначно обчислити відсутні для розрахунку ПЧ параметри:

- 1 Ефективний кут виходу з решітки.
- 2 Геометричний кут входу в решітку.

Всі подальші позначення для цього алгоритму відповідають рис. 1. Необхідно відзначити, що в даному алгоритмі геометричні характеристики профілів визначені в системі координат, початок якої збігається з координатами центру кола вихідної кромки профілю. З огляду на це, при визначенні необхідних нам параметрів, поворот профілів будемо здійснювати відповідно до центрів їх вихідних кромки, тобто щодо початку координат.

Нові координати центрів кіл будемо визначати за допомогою тригонометричних співвідношень. Для цього скористаємося полярною системою координат з центром, який відповідає центру вихідної кромки профілю (координати –  $X_{kc} = 0, Y_{kc} = 0$ ).

Попередньо визначимо радіус-вектори і кути, що визначають положення центрів кіл в полярній системі координат. Це будуть радіус-вектори

$$rc_i = \sqrt{Xc_i^2 + Yc_i^2} \quad (1)$$

та відповідні їм кути

$$\varphi_{0i} = \arctg\left(\frac{Yc_i}{Xc_i}\right), \quad (2)$$

де  $i, Xc_i, Yc_i$  – номер кола, яке описує ділянку профілю, а також координати його центру відпові-

дно. Радіус-вектори  $rc_i$  і кути  $\varphi_{0i}$  відповідають положенню профілю з початковим кутом установки, наприклад рівному нулю ( $\beta y^* = 0$ ). В цьому випадку профіль лежить на хорді (див. рис. 1 – верхній профіль). Якщо кут установки профілю буде змінюватися  $\beta y = \beta y^* + \Delta\beta y$ , то природно відповідним чином будуть змінюватися і координати центрів кіл, що його описують. В цьому випадку в полярній системі координат зміняться тільки кути  $\varphi_i$ :

$$\varphi_i = \varphi_i^* + \Delta\beta y. \quad (3)$$

Таким чином, нові значення координат центрів кіл сусіднього профілю в декартовій системі координат будуть рівні:

$$\left. \begin{aligned} Yc_i &= rc_i \sin \varphi_i - t \\ Xc_i &= rc_i \cos \varphi_i \end{aligned} \right\}. \quad (4)$$

Знаючи значення  $Xc_i$  і  $Yc_i$  для заданого кута установки  $\beta y$ , визначимо горло решітки. Для цього попередньо обчислимо відстані між центрами кіл, що описують ділянки сусіднього профілю і центром вихідної кромки початкового (верхнього, рис. 1) профілю з координатами  $X_{kc} = 0, Y_{kc} = 0$ :

$$Rr_i = \sqrt{Xc_i^2 + Yc_i^2}. \quad (5)$$

В цьому випадку горло решітки дорівнюватиме:

$$a_i = Rr_i - R_i - Rk, \quad (6)$$

ефективний кут виходу відповідно

$$\beta_{2\text{эф}}^i = \arcsin\left(\frac{a_i}{t}\right). \quad (7)$$

і геометричний кут входу відповідно

$$\beta_{1g} = \beta_{1g}^* + \Delta\beta y, \quad (8)$$

де  $Rk, a_i, R_i$  – радіус вихідної кромки, горло решітки, радіус  $i$ -го кола, що бере участь в утворенні горла решітки відповідно. У зв'язку з тим, що кіл, потенційно здатних брати участь в утворенні горла, може бути кілька, необхідно визначити (знайти) те єдине коло, яке в кожному конкретному випадку буде безпосередньо формувати горло решітки. Для цього визначимо нові координати точки сполучення кіл, які можуть брати участь у формуванні горла решітки профілів. З огляду на те, що всі точки профілю і координати центрів кіл, які можуть утворити горло решітки повертаються на один і той же кут ( $\Delta\beta y$ ) відносно центру кола вихідної кромки, нові координати точки сполучення визначимо за допомогою тригонометричних співвідношень, аналогічно визначенню координат центрів кіл, які беруть участь у формуванні горла решітки.

$$\left. \begin{aligned} yt &= rt \sin(\gamma t^* + \Delta\beta y) \\ xt &= rt \cos(\gamma t^* + \Delta\beta y) \end{aligned} \right\}, \quad (9)$$

де  $rt, \gamma t^*$  – радіус-вектор і кут точки сполучення в полярній системі координат при початковому куті установки  $\beta y^*$ , а  $xt, yt$  – координати точки сполучення кіл в декартовій системі координат при  $\beta y = \beta y^* + \Delta \beta y$ . З огляду на це, кут  $\gamma t^*$  визначається наступним чином:

$$\gamma t^* = \arcsin\left(\frac{Yt}{rt}\right), \quad (10)$$

де  $Yt$  це  $y$  – координата точки сполучення кіл при  $\beta y^*$ , а  $rt$  її радіус-вектор.

Для визначення кола (на випуклій стороні профілю), що бере участь в утворенні горла решітки будемо використовувати координати точки перетину цього кола з прямою, що з'єднує її центр з центром кола вихідної кромки сусіднього профілю. Якщо, наприклад, абсолютні значення координат цієї точки будуть більше абсолютних значень відповідних координат точки сполучення, то вибираємо (див. рис. 1) друге коло, в іншому випадку – перше.

Слід зазначити, що в математичній моделі розрахунку ПЧ «з заданими профілями» використовуються два алгоритми. Перший з них наведено вище, а другий, аналогічний першому, але призначений для визначення кута установки профілів при заданих шагу решітки та ефективному куту виходу.

Наявність цих алгоритмів розширює можливості формування постановок оптимізаційних задач і дозволяє в процесі їх розв'язання однозначно пов'язувати між собою три важливі параметри турбінних решіток, які досить суттєво впливають на їх ефективність:

- Шаг решітки.
- Ефективний кут виходу.
- Геометричний кут входу.

Використання наведених алгоритмів при розв'язанні оптимізаційних задач дозволяє також в автоматичному режимі визначати наявність чи відсутність звисання вихідної кромки, а також розміри необхідної їх підрізки для формування гарантованої технологічної щілини.

Оцінка впливу підрізування вихідних кромки робочих лопаток на ефективність решіток виконувалася за допомогою методики [8]. Методика була створена за допомогою методу планування розрахункового експерименту з використанням результатів *CFD* розрахунків, які моделювали і оцінювали вплив розміру технологічної щілини на ефективність робочих решіток. На рис. 2 наведені розрахунковий об'єм (а) та картина течії пари в каналі робочої решітки (б, в) з технологічною підрізкою вихідних кромки для створення гарантованої щілини.

З використанням підсистеми оптимального проектування інтегрованої САПР «Турбоагрегат», що розробляється на кафедрі турбінобудування НТУ «ХП» [пакет прикладних програм *TOP (TurboOptProject)*], отримані дві групи по шість варіантів оптимальних конструкцій циліндра проточної частини ЦВТ К-330-23,5. В обох групах оптимальних ПЧ застосовувався робочий профіль 1ММК з потовщеною вихідний кромкою (1ММК-У).

У шести варіантах першої групи робочий профіль 1ММК-У був спрофільований зі збільшеним радіусом «животика», що забезпечує відсутність підрізування і звисання вихідних кромки з полок бандажної і замкової частини робочих лопаток. У шести варіантах другої групи оптимальних конструкцій ПЧ ЦВТ К-330-23,5 у профілю 1ММК радіус «животик» змінився лише на мінімально необхідну величину (відхилення радіуса вигнутої частини у порівнянні з оригінальним профілем склало менше 1 %), що забезпечує побудову профілю з необхідною товщиною вихідної кромки і не призводить до зниження ефективності робочих решіток.

У зазначених вище двох групах оптимальних конструкцій кожен з шести варіантів відрізнявся кількістю робочих лопаток ступенів. У першому варіанті кількість робочих лопаток кожного ступеня приймалося рівним кількості лопаток прототипу. У кожному з наступних варіантів кількість робочих лопаток збільшувалася для кожного ступеня на дві порівняно з попереднім варіантом оптимального рішення.

## 2 Планування розрахункового дослідження та формування постановок задач оптимального проектування

Для виконання поставленої мети був розроблений спеціальний план розрахункових досліджень. Цей план повинен забезпечити, як знаходження найбільш ефективної конструкції ПЧ ЦВТ турбіни К-330-23,5, так і отримання достатнього обсягу інформації для проведення аналізу і оцінки впливу на ефективність ПЧ основних параметрів і технологічних рішень, зазначених в меті цієї роботи.

В першу чергу була розв'язана задача визначення оптимальних параметрів ПЧ з використанням дворівневого рекурсивного алгоритму оптимізації. При розв'язанні цієї задачі всі лопатки робочих решіток формувалися з профілю 1ММК з потовщеною вихідною кромкою і збільшеним радіусом кола «животика».

На першому рівні оптимізації визначалися оптимальні значення висот соплових і робочих лопаток при постійному кореновому діаметрі, а також кути установок соплових і робочих профілів. При цьому забезпечувалося виконання обмежень, що наведені нижче:

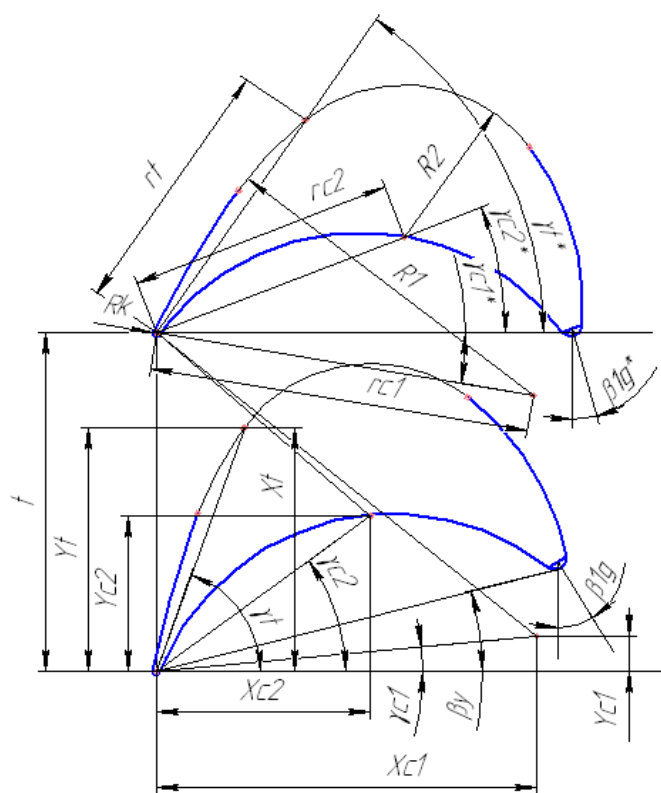
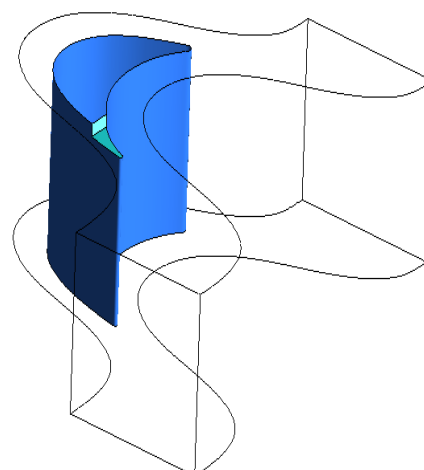
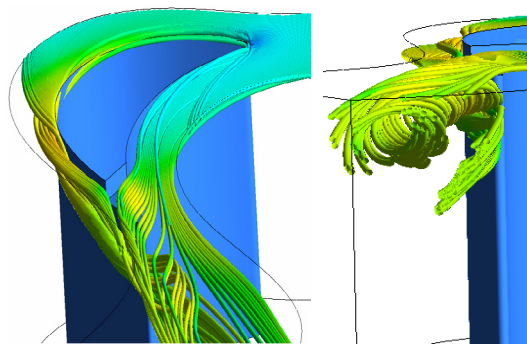


Рис. 1 – Позначення до алгоритму



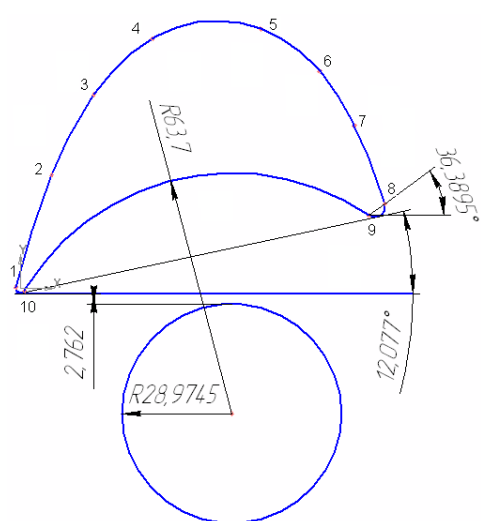
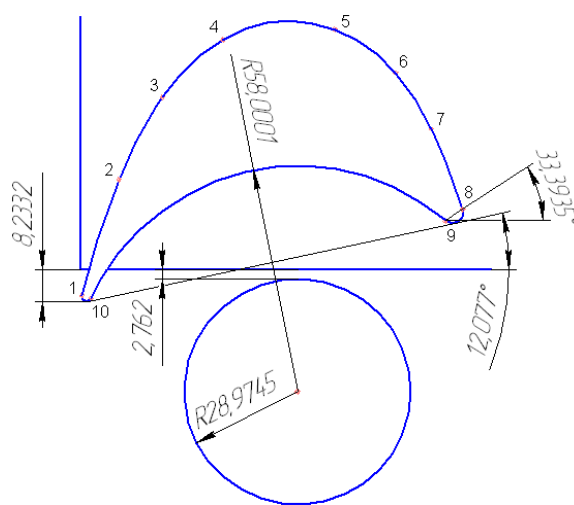
а



б

в

Рис. 2 – До створення методики оцінки впливу підрізки вихідної кромки на ефективність робочих решіток: а – розрахунковий об'єм; б, в – картини течії пари через щілину в робочій лопатці

Рис. 3 – Геометрія профілю 1ММК-У для варіантів оптимальних конструкцій ПЧ **першої групи**Рис. 4 – Геометрія профілю 1ММК для варіантів оптимальних конструкцій ПЧ **другої групи**

1 Параметри робочого тіла перед і за циліндром були рівні відповідних параметрів прототипу.

2 Кореневі діаметри соплових апаратів і робочих коліс залишалися незмінними і відповідали діаметрам конструкції ротора ПЧ ЦВТ турбіни К-330-23,5 виробництва АТ «Турбоатом».

3 Тиск пара в місці відбору за 8 (9)-м ступенем не відхиляється більше 0,1 МПа щодо значення цього параметра в існуючій конструкції прототипу.

Профілі соплових апаратів кожного ступеня і числа соплових лопаток відповідали конструкції прототипу.

На другому рівні оптимізації визначалися оптимальні числа робочих лопаток.

Схема параметризації задачі оптимізації змінних 1-го рівня наведена в таблиці 1. Відповідно до даної схеми на першому рівні оптимізації безпосередньо оптимізується 18 параметрів і непрямым чином оптимізуються ще 15 параметрів. Крім того, за допомогою спеціального алгоритму автоматичного проектування обводів ступені для кожної зміни висот робочих лопаток в процесі оптимізації визначалися відповідні їм значення висот лопаток соплового апарату (11 параметрів).

Таким чином, перший рівень оптимізації дозволяє знайти оптимальне співвідношення 44 конструктивних параметрів ПЧ циліндра. Другий рівень забезпечує знаходження ще 11 оптимальних значень (чисел робочих лопаток). Разом в результаті розв'язання дворівневої задачі оптимального проектування ПЧ ЦВТ турбіни К-330-23,5 визначаються оптимальне поєднання значень 55 параметрів.

Отримана в результаті розв'язання дворівневої оптимізаційної задачі форма обводів ПЧ, в подальших дослідженнях була використана як **базова**. Мається на увазі, що розв'язання інших оптимізаційних задач даного дослідження здійснювалося з незмінними середніми діаметрами і висотами соплових і робочих лопаток, рівень яких був визначений в результаті розв'язання описаної вище дворівневої оптимізаційної задачі.

Інша частина розробленого плану досліджень призначена для розв'язання наступних двох задач.

Мета першої задачі полягає в оцінці і аналізі впливу на результати оптимізації технологічних аспектів виготовлення цільнофрезерованих робочих лопаток. Розв'язання цієї задачі має надати інформацію про ступінь впливу підрізування вихідних кромок робочих лопаток на ефективність ПЧ і забезпечити проведення порівняльного аналізу двох технологічних підходів виготовлення цільнофрезерованної робочих лопаток – з підрізуванням вихідних кромок і без підрізування.

Друга ціль плану спрямована на вивчення степені впливу чисел робочих лопаток на ефективність турбінних ступенів і ПЧ ЦВТ турбіни К-330-23,5 в цілому.

Для розв'язання зазначених задач плану всі

оптимізаційні задачі розрахункового дослідження були розділені на дві групи по шість задач.

В першу групу, як зазначалося раніше, були включені оптимізаційні задачі по визначенню оптимальних кутів установки соплових і робочих решіток. Дані завдання вирішувалися з використанням в робочих решітках профілів ІММК зі збільшеним радіусом кола «животика». В даному випадку при модифікації (збільшенні радіуса кола «животика») вихідного профілю ІММК переслідувалися дві мети:

1 Дотримання, прийнятої в АТ «Турбоатом» технології виготовлення цільнофрезерованої робочих лопаток.

2 Прагнення до мінімально можливої зміни форми каналів решітки, в порівнянні з формою каналів, утворених оригінальним варіантом профілю ІММК, тобто до мінімально необхідного збільшення радіусу кола «животика» профілю.

У другій групі оптимізаційних задач використовувався робочий профіль ІММК, у якого радіус кола «животика» практично не відрізнявся від аналогічного радіусу вихідного профілю. Зазначені відмінності були мінімальні і викликані необхідністю забезпечення сполучення кола «животика» з колами вхідної і потовщеної вихідної кромками профілю.

Слід зазначити, що збільшення радіусу кола, що описує «животик» профіля призводить не тільки до деформації каналу в порівнянні з використанням атласних профілів, а і до збільшення геометричного кута входу профіля, що може призвести до збільшення рівня як профільних втрат, так і додаткових втрат від збільшення кута атаки.

Геометрії профілів для першої і другої груп варіантів приведені відповідно на рис. 3 і рис. 4, а їх характеристики в таблицях 2 і 3.

### 3 Результати оптимізації

Відповідно до описаним вище планом численних досліджень були знайдені дванадцять варіантів оптимальних рішень для ПЧ ЦВТ К-330-23,5. Отримані рішення згруповані по шість варіантів в дві групи. Розрахункові дослідження варіантів облопачення другої групи проводилися при висоті підрізування вихідних кромок всіх робочих лопаток рівній 1,2 мм з кожного торця.

Меридональні обводи базового оптимального варіанту ПЧ для всіх 12 варіантів ПЧ наведені на рис. 5. Як видно з рис. 5 оптимізація обводів ПЧ привела до зменшення висот лопаток всіх ступенів. Тут слід зазначити, що закладені в обмеження на зміну висот лопаток були дещо послаблені. В першу чергу, це викликано тим, що зменшення висот лопаток в порівнянні з прототипом не потребує збільшення розмірів корпусу ЦВТ і гарантує можливість їх розміщення в існуючому корпусі. Крім того, зазначене зниження жорсткості обмежень дозволило отримати додатковий виграв в економічності ПЧ ЦВТ К-330-23,5 порядку 1,8...2,2 %.

Таблиця 1 – Схема параметризації оптимізаційної задачі для змінних, що оптимізуються на першому рівні оптимізації

Назва параметра, що оптимізується	Позн.	Один. вим.	Номер турбінного ступеня										
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Висота робочої лопатки по вихідній кромці	$l_{21}$	мм	Оптимізується	Оптимізується	Лінійна інтерполяція	Лінійна інтерполяція	Лінійна інтерполяція	Лінійна інтерполяція	Оптимізується	Оптимізується	Оптимізується	Лінійна інтерполяція	Оптимізується
Кут установки соплового профілю	$\beta_{\text{уст}1}$	град	Оптимізується	Дорівнює $\beta_{\text{уст}1}$ ступеня 1	Оптимізується	Оптимізується	Оптимізується	Дорівнює $\beta_{\text{уст}1}$ ступеня 5	Дорівнює $\beta_{\text{уст}1}$ ступеня 5	Оптимізується	Оптимізується	Дорівнює $\beta_{\text{уст}1}$ ступеня 9	Оптимізується
Кут установки робочого профілю	$\beta_{\text{уст}2}$	град	Оптимізується	Дорівнює $\beta_{\text{уст}2}$ ступеня 1	Оптимізується	Дорівнює $\beta_{\text{уст}2}$ ступеня 3	Дорівнює $\beta_{\text{уст}2}$ ступеня 3	Дорівнює $\beta_{\text{уст}2}$ ступеня 3	Дорівнює $\beta_{\text{уст}2}$ ступеня 3	Оптимізується	Оптимізується	Дорівнює $\beta_{\text{уст}2}$ ступеня 9	Оптимізується

Таблиця 2 – Геометрія профілю 1ММК варіантів оптимальних конструкцій ПЧ першої групи (рис. 3)

$N$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$R$ , мм	251,665	108,324	50,0129	32,6434	37,7032	66,3912	178,563	2,7498	63,7	1,2418
$X_c$ , мм	242,825	109,231	60,8765	51,8385	50,027	27,9454	-73,793	93,6194	55,8669	0
$Y_c$ , мм	-61,22	-9,2651	23,3237	38,1567	33,4322	15,1182	-32,124	21,573	-33,111	0
$X_t$ , мм	-1,2047	8,2729	19,4032	34,8531	63,5253	79,0478	88,169	96,2414	92,0572	1,0683
$Y_t$ , мм	0,3012	29,9976	51,2748	66,0329	68,6363	57,5014	43,0829	22,4017	19,3102	-0,6331

Таблиця 3 – Геометрія профілю 1ММК варіантів оптимальних конструкцій ПЧ другої групи (рис. 4)

$N$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$R$ , мм	251,665	108,324	50,0129	32,6434	37,7032	66,3912	178,563	2,7498	58,0001	1,2418
$X_c$ , мм	242,825	109,231	60,8765	51,8385	50,027	27,9454	-73,793	93,6194	53,9624	0
$Y_c$ , мм	-61,22	-9,2651	23,3237	38,1567	33,4322	15,1182	-32,124	21,573	-24,447	0
$X_t$ , мм	-1,2047	8,2729	19,4032	34,8531	63,5253	79,0478	88,169	96,2414	91,8244	1,1253
$Y_t$ , мм	0,3012	29,9976	51,2748	66,0329	68,6363	57,5014	43,0829	22,4017	19,49	-0,5251

Всі інші геометричні характеристики для кожного оптимального варіанту ПЧ абсолютно різні. Деякі з них будуть наведені відповідно до розгляду першої та другої груп оптимальних ПЧ.

**Перша група (без підрізки вихідних кромок)**

Порівняння ефективності прототипу ПЧ ЦВТ та перших 6-ти оптимальних варіантів наведені на рис. 6.

Як видно з рис. 7 і 8 ефективні кути виходу соплових, а особливо робочих решіток оптимальних ПЧ ЦВТ суттєво зросли. При цьому геометричні кути входу робочих решіток зменшилися. Разом з збільшенням кутів натікання на робочі решітки це призвело до зменшення кутів атаки (рис. 9) та збільшення ефективності робочих решіток (рис. 10) оптимальних варіантів ПЧ в порівнянні з аналогічними характеристиками прототипу.

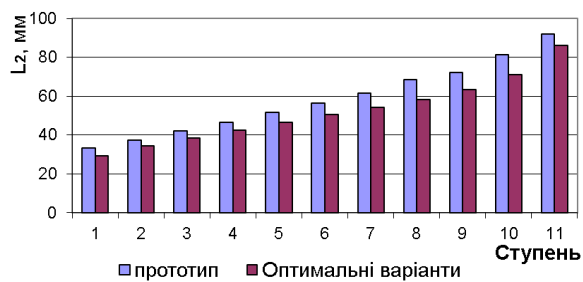


Рис. 5 – Порівняння висот робочих лопаток ПЧ прототипу і оптимальних варіантів ПЧ

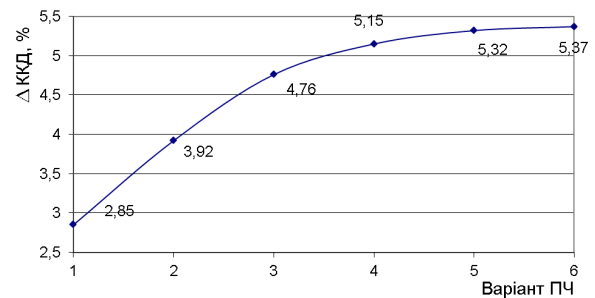


Рис. 6 – Приріст ефективності оптимальних ПЧ першої групи ЦВТ К-330-23,5 в порівнянні з прототипом

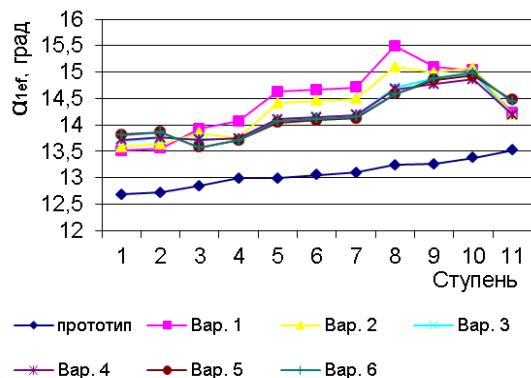


Рис. 7 – Порівняння ефективних кутів виходу з соплових решіток ПЧ прототипу і оптимальних варіантів ПЧ першої групи

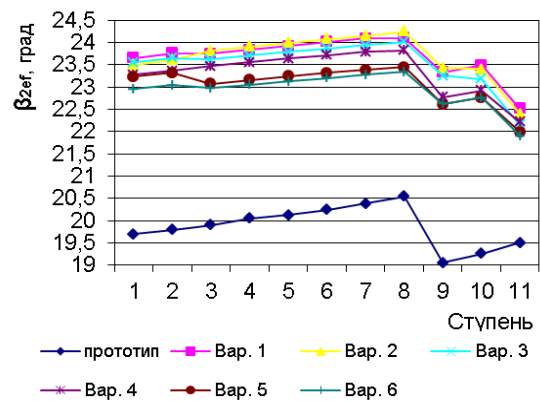


Рис. 8 – Порівняння ефективних кутів виходу з робочих решіток ПЧ прототипу і оптимальних варіантів ПЧ першої групи

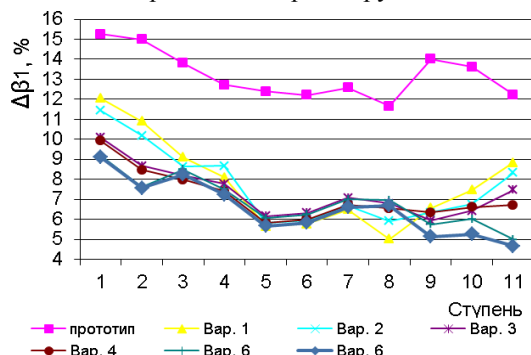


Рис. 9 – Порівняння кутів атаки на робочі решітки ротора ПЧ

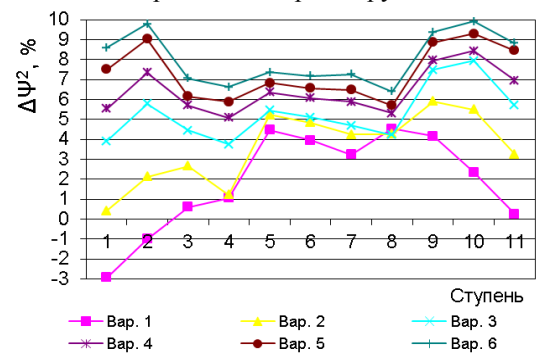


Рис. 10 – Приріст ефективності робочих решіток ротора оптимальних варіантів першої групи ПЧ

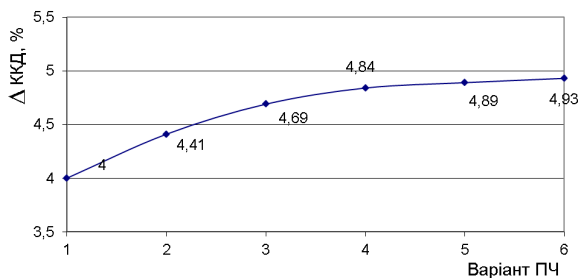


Рис. 11 – Приріст ефективності оптимальних ПЧ другої групи ЦВТ К-330-23,5 в порівнянні з прототипом

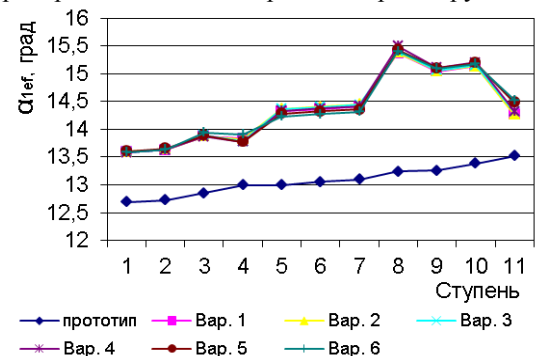


Рис. 12 – Порівняння ефективних кутів виходу з соплових решіток ПЧ прототипу і оптимальних варіантів ПЧ другої групи



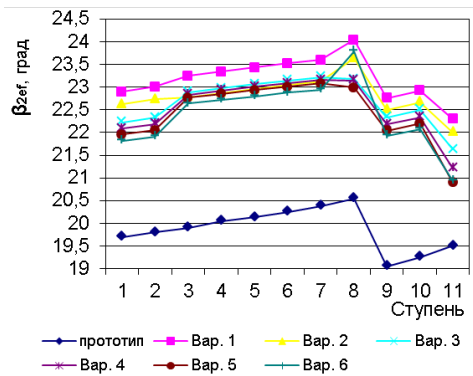


Рис. 13 – Порівняння ефективних кутів виходу з робочих решіток ротора ПЧ прототипу і оптимальних варіантів ПЧ другої групи

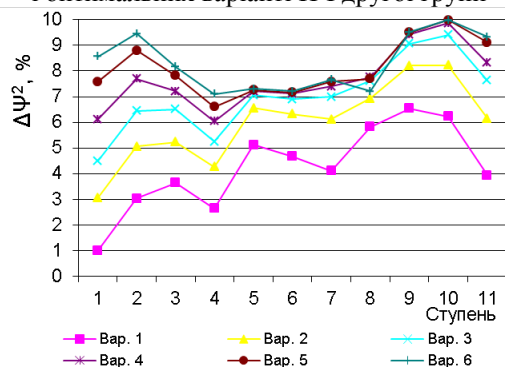


Рис. 15 – Приріст ефективності робочих решіток ротора оптимальних варіантів ПЧ другої групи

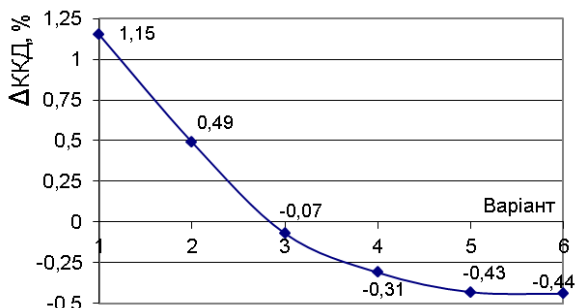


Рис. 17 – Різниця ККД оптимальних варіантів ПЧ ЦВД, облопачення роторів яких, виконано за другою та першою технологіями, відповідно

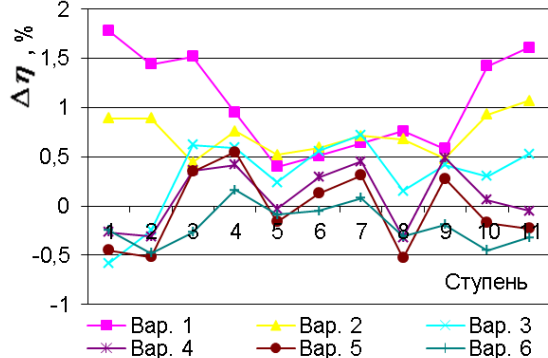


Рис. 19 – Різниця внутрішніх відносних ККД ступенів ПЧ ЦВД К-330-23,5 другої та першої груп

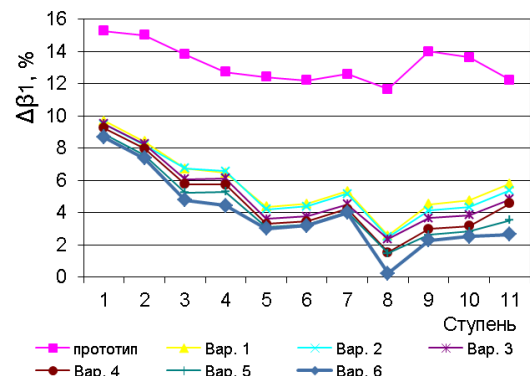


Рис. 14 – Порівняння кутів атаки на робочі решітки ротора ПЧ другої групи

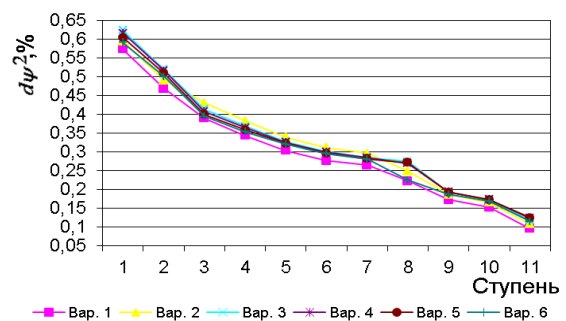


Рис. 16 – Додаткові втрати від підрізування вихідних кромки робочих лопаток в ступенях оптимальних варіантів ПЧ другої групи

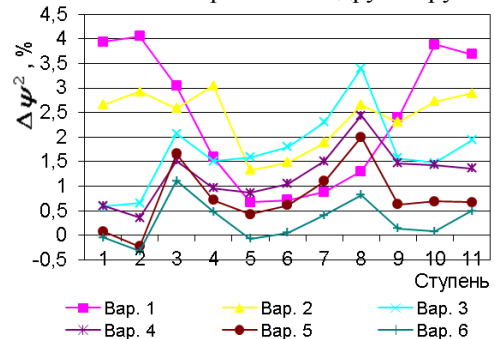


Рис. 18 – Різниця квадратів коефіцієнтів швидкості робочих решіток ротора ПЧ ЦВД К-330-23,5 другої та першої груп

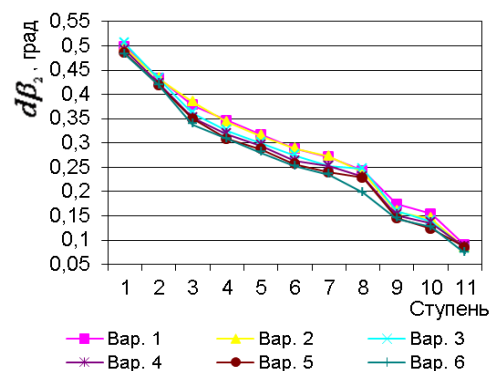


Рис. 20 – Збільшення кутів виходу потоку з робочих решіток від підрізування вихідних кромки

Таким чином, використання сучасних методів оптимального проектування ПЧ навіть з погіршеною формою робочих профілів забезпечити суттєве зростання ефективності соплових і робочих решіток ротора, турбінних ступенів і всієї проточної частини ЦВТ турбіни К-330-23,5 загалом.

З рис. 6, видно, що при оптимізації параметрів ПЧ з числами робочих лопаток кожного ступеня, збільшеними на 6 лопаток (*варіант 4*), вдається отримати суттєвий приріст економічності (більше 5 %). У той же час максимальний ефект досягається при збільшенні числа робочих лопаток на 10 штук (*варіант 6*).

На рис. 7–10 порівнюються основні геометричні параметри і характеристики ефективності проточної частини ЦВТ прототипу з аналогічними параметрами, отриманими в результаті розв'язання шести задач оптимального проектування ПЧ.

Аналогічні розрахункові дослідження були проведені і для другої групи варіантів ПЧ, в яких моделювалася технологія виготовлення цільнофрезерованих робочих лопаток з підрізуванням вихідних кромок, які звисають з полок (див. рис. 2, 4).

Порівняння результатів розв'язання шести оптимізаційних задач ПЧ ЦВТ другої групи з характеристиками прототипу наведено на рис. 11–16.

#### **Друга група (з підрізками вихідних кромок)**

Розв'язання задач оптимального проектування проточних частин ЦВТ другої групи, також забезпечує суттєвий приріст ККД (див. рис. 11). При цьому, видно, що навіть не збільшуючи кількість робочих лопаток можна досягти збільшення ККД ПЧ ЦВТ на 4 % тільки за рахунок визначення оптимальних рівнів параметрів, що оптимізувалися.

Також як і для оптимальних конструкцій, з першої групи ПЧ істотним приростом ефективності характеризується варіант 2.4 (понад 4,5 %). У той же час максимальний ефект досягається при збільшенні числа робочих лопаток кожного ступеня на 10 шт. (варіант 2.6).

Відповідно до плану розрахункових досліджень, обводи ПЧ в другій групі оптимальних рішень відповідали обводам ПЧ ЦВТ з першої групи (рис. 6).

Рішення щодо визначення оптимальних кутів установки і пов'язаних з ними ефективних кутів виходу потоку і геометричних кутів входу для оптимальних варіантів першої та другої груп ПЧ якісно збігаються. Кількісні значення цих параметрів відрізняються (рис. 12–14) і мають свої особливості. Тут необхідно зазначити, що практично для всіх варіантів оптимальних рішень другої групи ПЧ ЦВТ ефективні кути виходу з соплових решіток дуже близькі (рис. 12). У той же час ефективні кути виходу з робочих решіток від варіанту до варіанту змінюються (рис. 13).

В отриманих оптимальних конструкціях ПЧ ЦВТ другої групи досягнуті найменші значення кутів атаки потоку, що натікає на робочі решітки (рис. 14). Це призвело (не дивлячись на наявність додаткових втрат від підрізування вихідних кромок), особливо для перших двох варіантів, до суттєвого підвищення ефективності ПЧ. Цей факт ґрунтується на реальних фізичних особливостях обтікання активних решіток з високими значеннями відносних кроків [8], для яких в зоні великих кутів атаки залежність втрат енергії характеризується дуже високими значеннями і високим градієнтом.

Внаслідок цього, зі збільшенням чисел робочих лопаток і переходом в зону, близьку до оптимальних значень відносних шагів робочих решіток ротора, градієнт приросту ефективності оптимальних варіантів ПЧ ЦВТ К-330-23,5 другої групи знижується (рис. 11).

#### **Обговорення результатів**

Зіставляючи результати оптимізації проточних частин ЦВТ турбіни К-330-23,5 облопачення роторів, яких виконано за двома різними технологіями можна відмітити наступне (див. рис. 17):

- якщо числа лопаток робочих коліс близькі або дорівнюють числам робочих лопаток конструкції ЦВТ К-330-23,5 прототипу то негативний вплив підрізування вихідних кромок на ефективність ПЧ менш відчутно в порівнянні з втратами від ударного натікання потоку пари на робочі лопатки ротора. Тому, для таких ПЧ, заходи, що дозволяють зменшити втрати від ударного натікання, дають більший ефект, ніж використання цільнофрезерованих лопаток без підрізування вихідних кромок;

- для оптимальних варіантів ПЧ, в яких числа робочих лопаток збільшені на 6 і більше штук, втрати від підрізування вихідних кромок виходять на передній план по відношенню до втрат від ударного натікання в зв'язку з істотним зменшенням останніх. У цих випадках доцільно використовувати цільнофрезеровані лопатки без підрізування вихідних кромок.

В цьому випадку заходи, спрямовані на зменшення кутів атаки потоку на робочі колеса ротора, вносять більш істотний внесок в підвищення ефективності ПЧ, ніж негативний вплив додаткових втрат, викликаних підрізкою вихідних кромок робочих лопаток. У той же час, в зоні оптимальних відносних шагів робочих решіток (варіанти 4–6) позитивний ефект від зменшення кутів атаки має менш істотне значення (рис. 15).

При цьому рівень втрат від підрізування вихідних кромок змінюється від варіанту до варіанту ПЧ ЦВТ досить слабо і має практично дуже близькі значення у відповідних ступенях (рис. 16).

В роботі, також показано, що використання профілів зі збільшеними радіусами кін, які формують «животик» профіля, призводить, по-перше, до деякої деформації каналу, що, природно, негативно позначається на обтіканні таких профілів, і, по-друге, веде до збільшення геометричного кута входу профілю через зміщення точки дотику кола, яке формує «животик» профіля і кола вхідної кромки профілю. Зазначене збільшення геометричного кута входу негативно впливає на ефективність робочих решіток в високонавантажених турбінних ступенях, у яких потік робочого тіла натікає з ударом в «животик» профіля, що є досить характерним для ступенів ПЧ ЦВТ К-330-23,5.

Особливо помітна різниця геометричних кутів входу робочих решіток для перших варіантів оптимальних ПЧ ЦВТ. При цьому варіант ПЧ другої групи, в робочих решітках якого застосовані оригінальні профілі ІММК, а робочі лопатки виконані з підрізуванням вихідних кромок, має вираж ККД в 1,15 % (рис. 17) у порівнянні з відповідним варіантом ПЧ з першої групи. Цей вираж досягнуто, в основному, за рахунок зменшення геометричних кутів входу і, як наслідок, зменшення витрат від кута атаки потоку пари, що натікає на робочі решітки.

Таким чином, очевидним стає факт можливості отримання високоефективних рішень для ПЧ ЦВТ з високонавантаженими ступенями, в яких використовуються робочі решітки з істотно збільшеними відносними шагами (малою кількістю робочих лопаток). Для таких випадків доцільним є застосування в робочих решітках профілів (наприклад, ІММК) оригінальної форми, а лопатки допускається виконувати з підрізуванням вихідних кромок.

Для прийняття рішення про вибір варіанта виготовлення цільнофрезерованої робочих лопаток необхідно розуміти механізм впливу підрізування вихідних кромок на фізичні процеси в ступені і про тісний зв'язок геометрії робочих і соплових решіток з параметрами, що визначають розміри підрізування. Так, безумовно, очевидним є факт негативного впливу на ефективність робочих решіток наявності підрізування вихідних кромок (рис. 16).

Зазначене збільшення ККД, і одна з основних причин, що забезпечила це збільшення, досить добре пояснюються рис. 18, 19 з яких видно суттєву кореляцію між різницями квадратів коефіцієнтів швидкості робочих решіток ротора та різницями внутрішніми відносними ККД турбінних ступенів другої та першої груп.

Однак, крім прямого негативного впливу підрізування вихідних кромок на ефективність робочої решітки високонавантажених турбінних ступенів, одночасно виникає ряд факторів, які непрямим чином також ведуть до додаткового зниження її ефективності. Непрямий негативний вплив підрі-

зування на якість робочої решітки високонавантажених ступенів обумовлений, в першу чергу, наявністю прямої залежності збільшення кутів виходу потоку з решіток від відносних розмірів підрізування вихідних кромок (рис. 20).

Зазначений факт збільшення кута виходу потоку, при інших рівних умовах, однозначно призведе до збільшення витрат робочого тіла через робочу решітку, що розглядається. Компенсація збільшення витрати і приведення його до рівня, відповідного заданій витраті в голову циліндра, може бути здійснено (при збереженні обводів ПЧ) в крайній мірі, трьома способами:

1 Зменшенням ефективного кута виходу робочої решітки (збільшення кута установки робочих профілів).

2 Зменшенням ефективного кута виходу соплової решітки.

3 Одночасним узгодженням зменшення ефективних кутів виходу соплової і робочої решіток.

Будь-який з зазначених способів відповідного зменшення витрати робочого тіла через турбінний ступень призводить до збільшення кута атаки потоку пари на робочу решітку.

Перший спосіб забезпечується збільшенням кута установки робочих профілів. Таке рішення призводить до відповідного збільшення геометричного кута входу решітки і, як наслідок, збільшення кута атаки і збільшення, пов'язаних з ним додаткових витрат в решітці.

Використання другого способу призведе до зменшення кута входу потоку пари в робочу решітку, що в високонавантажених турбінних ступенях також пов'язано зі збільшенням кута атаки і, відповідно, зі збільшенням витрат в робочій решітці.

Третій підхід узгодження витрати робочого тіла через турбінний ступень з витратою, яка дорівнює витраті на вхіді в циліндр, призведе, аналогічно першим двом, до збільшення кута атаки і витрат від удару в робочих решітках.

При застосуванні технології виготовлення цільнофрезерованої робочих лопаток з підрізуванням вихідних кромок вельми важливою обставиною, що впливає на ефективність робочих решіток і всієї ПЧ, є розміри підрізувань. Причому, зменшення розмірів підрізування дозволить знизити не тільки їх прямиї негативний вплив, але, і призведе до зменшення кутів атаки потоку пари на робочі решітки та пов'язаних з цим явищем додаткових витрат енергії.

Зазначені особливості впливу розмірів підрізування вихідних кромок робочих лопаток на ефективність ПЧ є особливо актуальними для високонавантажених ступенів, що мають завищені значення відносних шагів робочих решіток.

В інших випадках, наприклад, для робочих решіток з оптимальними або меншими оптимальними значеннями відносних шагів (зі збільшеною кількістю робочих лопаток), питома вага негативного

впливу на ефективність турбінного ступеня, описаних вище непрямих факторів підрізування вихідних кромок робочих лопаток, знижується істотно. Цей факт пояснюється досить просто: такі решітки характеризуються значно меншим рівнем втрат від удару і зниженим градієнтом залежності цих втрат від величини кута атаки.

У подібних решітках вплив геометричного кута входу і, відповідно, кута атаки на втрати в решітці носить досить плавний, низькоградієнтний характер [8] і не так сильно позначається на загальному результаті. Тут на перший план виходять безпосередньо втрати, пов'язані з перетоками в щілинах, утворених підрізами вихідних кромок. Як видно з рис. 17 загальний рівень економічності (варіанти 5, 6) оптимальних ПЧ ЦВТ з робочими лопатками, які мають підрізування вихідних кромок, може виявитися нижче аналогічних рішень з робочими лопатками без підрізування вихідних кромок. Очевидно, що в гранично можливішому випадку, в якому висота підрізування вихідних кромок матиме гарантоване мінімально необхідне значення, рівень безпосереднього негативного впливу підрізування може бути зведений до мінімуму. При цьому зазначені варіанти першої і другої груп оптимальних ПЧ, можуть виявитися практично рівноцінними по економічності.

Дійсно, з одного боку застосування в робочих решітках профілів зі збільшеним радіусом кола «животика» (група 1) вносить спотворення форми каналів решітки і, як наслідок, призведе до деякого збільшення профільних втрат. З іншого боку, використання в робочих решітках оригінальних (атласних) профілів пов'язане з необхідністю застосування лопаток з підрізкою вихідних кромок (група 2), а значить, навіть при гарантованому забезпеченні мінімально необхідної для складання робочих коліс висоти підрізування будуть присутні втрати, викликані цими підрізами.

Цілком ймовірно, що при незначному збільшенні радіуса кола «животика» (наприклад, не більше ніж на 10 %), а також при забезпеченні мінімально необхідної висоти підрізування вихідних кромок, відповідні рівні додаткових втрат в решітках, обумовлені зазначеними фактами, можуть мати досить близькі значення.

### Висновки

З урахуванням, проведених розрахункових досліджень можна зробити наступні висновки:

1 Отримані дванадцять варіантів оптимальних конструкцій проточної частини ЦВТ турбіни К-330-23,5 (дві групи по 6 варіантів):

- **Група 1.** Моделювалася технологія виготовлення цільнофрезерованих робочих лопаток без підрізування і звисання вихідних кромок за рахунок збільшення радіуса кола «животика» профілю 1ММК-У.

- **Група 2.** Моделювалася технологія виготовлення робочих лопаток сформованих профілем 1ММК оригінальної форми з підрізуванням і звисанням вихідних кромок.

2 Розв'язання задач оптимального проектування ПЧ ЦВД К-330-23,5 здійснювалося з використанням математичної моделі розрахунку проточної частини «з заданими профілями» в інтегрованому середовищі САПР «Турбоагрегат», що розробляється на кафедрі турбінобудування НТУ «ХП».

3 Перехід від прототипу ПЧ циліндра високого тиску турбіни К-330-23,5 до оптимального варіанту ПЧ дозволяє підвищити ККД ЦВТ від 2,87 % до 5,37 % для першої групи оптимальних варіантів і від 4,0 % до 4,93 % для другої групи оптимальних варіантів ПЧ.

4 Підвищення економічності оптимальних конструкцій було забезпечено наступними заходами:

- застосуванням оптимальної форми обводів ПЧ з дещо зменшеними висотами лопаток;
- підвищенням ефективності робочих решіток, за рахунок оптимального вибору кутів установки і чисел лопаток (відносних шагів) і істотного зниження втрат від удару;

- деяким зниженням рівня реактивності ступенів і як наслідок зменшенням втрат від прикореневих і радіальних протікання.

5 Усього в процесі пошуку оптимального рішення для кожного варіанту ПЧ визначалися значення 55 конструктивних параметрів.

6 Отримані варіанти оптимальних конструкцій не вимагають збільшення розмірів корпусу ЦВТ, в них збережені кореневі діаметри ступенів і збережено значення тиску пари в місці відбору (за 8-м ступенем без урахування регулюючого ступеня).

7 Для високонавантажених турбінних ступенів з збільшеними значеннями відносних шагів робочих решіток можна допускати застосування цільнофрезерованих робочих лопаток з підрізуванням вихідних кромок з профілями оригінальної форми (1ММК). При цьому обов'язково необхідно забезпечити висоту підрізування вихідних кромок не більше 1,0 мм., а кути атаки потоку пари в «животик» робочих профілів не повинні перевищувати 9,0 градусів.

8 Для високонавантажених ступенів з оптимальними або менше оптимальними значеннями відносних шагів робочих решіток ротора можна рекомендувати застосування цільнофрезерованих робочих лопаток без підрізування вихідних кромок. При цьому радіуси кола «животика» модифікованих робочих профілів не повинні перевищувати відповідні радіуси оригінальних профілів більше чим 10 %, а кути атаки потоку пари в «животик» робочих профілів не повинні бути більше 9,0 градусів.

## Список літератури

1. Усатий О. П., Животченко Ю. В. Аналіз впливу ефективності окремих відсіків потужної парової турбіни на результати оптимізації теплової схеми турбоблока. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. Харків: НТУ «ХПІ», 2018. № 11(1287). С. 19–25. Бібліогр.: 10 назв. ISSN 2078-774X. doi: 10.20998/2078-774X.2018.11.03.
2. Швецов В. Л., Кожешкурт И. И., Бойко А. В., Усатый А. П., Солодов В. Г., Хандримайлов А. А. Совершенствование цилиндра высокого давления турбины К-220-44-2М АЭС "Ловииса". *Теплоэнергетика*. 2013. № 2. С. 22–29. ISSN 0040-3636.
3. Бойко А. В., Усатый А. П., Руденко А. С. *Многокритериальная многопараметрическая оптимизация проточной части осевых турбин с учетом режимов эксплуатации*: моногр. Харьков: НТУ «ХПІ», 2014. 220 с. На рус. яз. ISBN 978-966-2426-94-6.
4. Усатый А. П. *Всерезжимная многопараметрическая многокритериальная оптимизация проточной части турбин в интегрированном информационном пространстве*: дис. ... д-р техн. наук : 05.05.16 / Усатый Александр Павлович. Харьков, 2012. 418 с.
5. Boiko, A., Govorushchenko, Y. and Usaty, A. *Optimization of the Axial Turbines Flow Paths*: monograph. New York: Published by Science Publishing Group 548 Fashion Avenue New York, NY 10018, U.S.A., 2016. 272 p. ISBN 978-1-940366-67-8. Mode of access: <http://www.sciencepublishinggroup.com/book/B-978-1-940366-67-8>.
6. Бойко А. В., Усатый А. П. Комплексная математическая модель процессов в турбине с регулируемыми отборами пара. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. Харків: НТУ «ХПІ», 2016. № 8(1180). С. 28–36. Бібліогр.: 11 назв. ISSN 2078-774X. doi:10.20998/2078-774X.2016.08.04.
7. Бойко А. В., Усатый А. П. Использование BiArc-кривых для описания контура турбинных профилей. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. Харків: НТУ «ХПІ», 2017. № 8(1230). С. 20–27. Бібліогр.: 17 назв. ISSN 2078-774X. doi: 10.20998/2078-774X.2017.08.03.
8. Дейч М. Е., Филиппов Г. А., Лазарев Л. Я. *Атлас профилей решеток осевых турбин*. Москва: Машиностроение, 1965. 96 с.

## References (transliterated)

1. Usaty A., Zhivotchenko Yu. "Analiz vplivu efektyv-nosti okremykh vidsikov potuzhnoyi parovoyi turbiny na rezul'taty optimizatsiyi teplovoyi skhemy turbobloku [Analyzing the Influence of the Efficiency of Individual Compartments of High-Power Steam Turbine on the Optimization Data of a Heat Flow Diagram of the Turbine Plant]". *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, No. 11(1287), pp. 19–25, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2018.11.03.
2. Shvetsov V. L., Kozheshkurt I. I., Boyko A. V., Usaty A. P. Solodov V.G., Khandrimaylov A.A. (2013.), "Udoskonalennya tsylindra vysokoho tysku turbiny K-220-44-2M AES "Loviisa" [Improving the high-pressure cylinder of the K-220-44-2M turbine at the Loviisa nuclear power station]". *Teploenergetika* [Thermal Engineering]. No. 2. pp. 22–29. ISSN 0040-3636.
3. Boiko, A. V., Usaty, A. P. and Rudenko, A. S. (2014), *Mnogokriterial'naya mnogoparametricheskaya optimizaciya protocnoy chasti osevykh turbin s uchetom rezhimov jekspluatatsii* [Multi-criterion multi-parametric optimization of flow paths of axial turbines taking into consideration their mode of operation], NTU "KhPI", Kharkov, Ukraine.
4. Usaty, A. P. (2012), *Vserezhimnaya mnogoparametricheskaya mnogokriterial'naya optimizatsiya protocnoy chasti turbin v integrirovannom informatsionnom prostranstve* [Multi-mode multi-parameters multi-criterion optimization of the turbine flow path in the integrated information space], D. Sc. thesis, NTU "KhPI", Kharkov, Ukraine.
5. Boiko, A., Govorushchenko, Y. and Usaty, A. (2016), *Optimization of the Axial Turbines Flow Paths*: monograph. New York: Published by Science Publishing Group 548 Fashion Avenue New York, NY 10018, U.S.A., 2016. 272 p. ISBN 978-1-940366-67-8. Mode of access: <http://www.sciencepublishinggroup.com/book/B-978-1-940366-67-8>.
6. Boiko, A. V. and Usaty, A. P. (2016), "Integrated Mathematical Model of the Processes in the Turbine with Adjustable Steam Extraction", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 8(1180), pp. 28–36, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2016.08.04.
7. Boiko, A. and Usaty, A. (2017), "Use BiArc-Curves for Contour Description of the Turbine Profiles", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, No. 8(1230), pp. 20–27, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2017.08.03.
8. Deych M. YE., Filippov H. A., Lazarev L. YA. (1965), *Atlas of grating profiles of axial turbines*, Mashynobuduvannya, Moscow, 96 p.

Надійшла (received) 08.12.2018

## Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Усатий Олександр Павлович (Usaty Oleksandr)** – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри турбінобудування, м. Харків, Україна; e-mail: [alpaus@ukr.net](mailto:alpaus@ukr.net), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-568-5007>.

**Пащенко Юрій Григорович (Paschenko Yuriy)** – заступник головного інженера – головного технолога, АТ «Турбоатом», м. Харків, Україна; e-mail: [office@turboatom.com.ua](mailto:office@turboatom.com.ua).

**Авдєєва Олена Петрівна (Avdieieva Olena)** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри турбінобудування, м. Харків, Україна; e-mail: [o.avdieieva@gmail.com](mailto:o.avdieieva@gmail.com), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9358-4265>.